饲料锌含量对方格星虫稚虫生长性能、体成分、体腔液中锌含量及碱性磷酸酶活性的影响

许明珠　张　琴*　童　潼　董兰芳　杨家林　蒋　艳　黄国强

(广西壮族自治区海洋研究所，广西海洋生物技术重点实验室，北海 536000)

摘　要：以蛋氨酸锌为锌源，在等氮等能的基础饲料中添加不同水平的锌，配制实际锌含量分别为9.3、31.7、49.9、90.1、168.6和326.5 mg/kg的6种试验饲料，饲喂平均体重为（14.54±0.10）mg的方格星虫稚虫8周，用以研究饲料锌含量对方格星虫稚虫生长、体成分、体腔液中锌含量及碱性磷酸酶活性的影响。每种试验饲料设3个重复，每个重复饲喂400尾方格星虫稚虫。结果表明：饲料锌含量对方格星虫的成活率、增重率和特定生长率均有显著影响（P<0.05），其中增重率和特定生长率均在饲料锌含量为49.9 mg/kg时达到最高值，并显著高于饲料锌含量最低（9.3 mg/kg）和最高（326.5 mg/kg）的组（P<0.05）。饲料锌含量对虫体粗脂肪和粗灰分含量有显著影响（P<0.05），虫体粗脂肪含量随着饲料锌含量的提高呈先增后降的趋势，而粗灰分含量的趋势则相反。饲料锌含量对虫体水分和粗蛋白质含量没有显著影响（P>0.05）。饲料锌含量对虫体体腔液锌含量和碱性磷酸酶活性均有显著影响（P<0.05）。虫体体腔液锌含量随着饲料锌含量的提高而不断上升，在饲料锌含量为326.5 mg/kg时达到最高值；而虫体体腔液中碱性磷酸酶活性则随着饲料锌含量的提高先上升后趋于稳定，当饲料锌含量为49.9 mg/kg时达到最高值。以增重率为评价标准，通过回归分析得出方格星虫稚虫饲料中适宜锌含量为41.93 mg/kg。

关键词：方格星虫稚虫；锌；生长性能；体成分；组织锌含量；碱性磷酸酶活性

中图分类号：S963　　　文献标识码：A　　文章编号：

微量元素可以分为必需微量元素与非必需微量元素两类，它们都是动物必需的营养素，具有不可替代的生理生化作用。微量元素在动物体内含量虽少，却直接或间接地参与机体几乎所有的生理和生化过程。锌是大多数动物所必需的一种微量元素，有“生命元素”之称[1-2]，在机体内具有广泛的生理生化功能：1)参与蛋白质代谢。锌是许多酶的组成成分或激活剂，

收稿日期：2016-01-12

基金项目：国家自然科学基金项目(31402304)；广西科学研究与技术开发计划(桂科转 13129024,桂科合 1346011-12,桂科合 14125008-2-20)；广西自然科学基金项目(2015GXNSFBB139005)；广西科学院基本科研业务费(15YJ22HYS15)

作者简介：许明珠（1988—），女，湖南湘潭人，硕士，从事水产动物营养与饲料的研究。；E-mail: xumingzhulian@163.com

*通信作者：张　琴，副研究员，硕士生导师，E-mail: zhangqin821220@163.com

如碳酸酐酶、羧肽酶、碱性磷酸酶(alkaline phosphatase，AKP)、乳酸脱氢酶等，到20世纪90年代，已发现的含锌酶有250多种，在生物体内，其通过碳酸酐酶、乳酸脱氢酶、谷氨酸脱氢酶、DNA聚合酶等多种酶类参与能量代谢、蛋白质合成、氧化还原等生化代谢过程。2)参与免疫调节。锌具有调节机体抗氧化和免疫等重要功能，当锌缺乏时，会降低机体的免疫功能和对疾病抵抗的能力[3-4]。因此，研究人工配合饲料配方中锌的最适含量具有重要意义。

方格星虫，俗称沙虫，是广西特色经济海产品之一，它具有高蛋白质、低脂肪且营养丰富等特点，深受广大消费者的追捧[5-6]。目前在饲料与营养方面，已有关于方格星虫稚虫蛋白质、脂肪、糖及微量元素铁、锰、硒等适宜需求量的相关研究[7-12]，为补充健全方格星虫对人工配合饲料中微量元素锌最适需求量的研究也必不可少。因此，本文开展了锌对方格星虫生长、体成分、体腔液中锌含量以及碱性磷酸酶活性的研究，为实现规模化养殖方格星虫的人工配合饲料配方的完善提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验饲料

制作饲料之前，分别对各原料进行粗蛋白质、粗脂肪含量以及总能进行测定，作为制定和调整饲料配方的依据，试验饲料组成及营养水平见表 1。以蛋氨酸锌(锌含量为 19%)为锌源，试验饲料蛋氨酸锌的添加量分别为 105.25、210.55、421.05、842.10、1 684.20 mg/kg(干物质基础)，换算为锌的添加量则分别为 0、20、40、80、160、320 mg/kg(干物质基础)，实测锌含量分别为 9.3、31.7、49.9、90.1、168.6 和 326.5 mg/kg(干物质基础)。试验饲料制作加工过程参照 Blair 等[13]介绍的方法。先将主要原料粉碎过 200 目筛，按照添加量的多少从低至高逐级称重并混合均匀，与鱼油搓匀之后再加少量水搓匀，烘干粉碎制成过 150 目筛的微颗粒饲料，装袋标号备用。

表 1　试验饲料组成及营养水平（干物质基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)　　　%

项目 Items	锌含量 Zinc content/(mg/kg)					
	9.3	31.7	49.9	90.1	168.6	326.5
原料 Ingredients						
酪蛋白 Casein	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000
明胶 Gelatin	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
鱼油 Fish oil	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
糊精 Dextrin	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
卵磷脂 Lecithin	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
褐藻酸钠 Sodium alginate	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

维生素预混料 Vitamin premix[1)]	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	14.000	13.989	13.979	13.958	13.916	13.832
矿物质预混料 Mineral premix[2)]	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
蛋氨酸锌 Zinc methionine		0.011	0.021	0.042	0.084	0.168
合计 Total	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
营养水平 Nutrient levels[3)]						
粗蛋白质 CP	43.91	44.12	44.03	43.92	44.71	44.07
粗脂肪 EE	9.15	9.01	9.24	9.19	9.05	9.14
粗灰分 Ash	9.12	9.65	9.43	9.39	9.17	9.42
总能 GE/(MJ/kg)	19.38	19.47	19.12	19.87	19.94	19.43

[1)] 维生素预混料为每千克饲料提供 Vitamin premix provided the following per kg of diets：VD 2 400 IU，VE 100 mg，VK l mg，VC 70 mg，VB_1 0.5 mg，VB_2 7 mg，VB_6 6 mg，VB_{12} 1 mg，D-泛酸 *D*-pantothenic acid 32.6 mg，烟酸 nicotinic acid 28 mg，生物素 biotin 1 mg，叶酸 folic acid 7.5 mg，肌醇 inositol 440 mg。

[2)]矿物质预混料为每千克饲料提供 Mineral premix provided the following per kg of diets：$CaCO_3$ 3 000 mg，$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 75 mg，CaH_2PO_4 4 125 mg，$MnSO_4 \cdot H_2O$ 270 mg，NaCl 1 200 mg，$Na_2SeO_3 \cdot H_2O$ 0.75 mg，KCl 750 mg，$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 1 525.5 mg，$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 750 mg，$AlSO_4 \cdot 6H_2O$ 6 mg，$CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 45 mg，KI 6 mg，沸石粉 zeolite 3 246.75 mg。

[3)]总能为使用 PARR 6400 氧弹式热量计所测的实测值，其他为计算值。Value of gross energy was measured by oxygen bomb calorimeter (PARR 6400), while the others were calculated values。

1.2 饲养管理

饲料制作完毕之后进入养殖试验阶段，养殖时间为 2013 年 8—10 月，养殖周期为 8 周。选用相同规格的 18 个水槽（65 cm×55 cm×45 cm），在水槽的底部均匀地铺设一薄层（3～4 cm 厚）经淡水彻底清洗消毒并经海水浸泡 1 d 的细沙，加水深约 20 cm，此为方格星虫稚虫的栖息地。选用健康无病、同一批苗种的方格星虫稚虫 7 200 条，平均体重为（14.54±0.10）mg，自然状态下体长在 1.17~1.65 cm，以 400 条为 1 个重复，3 个重复为 1 组，随机分为 6 组，分别饲喂 6 种锌含量不同的人工微颗粒饲料。投喂方法为过量投喂，即保证沙子表面有少量未食用完全的饲料。饲养采用自然光照周期，24 h 连续微充氧，水温维持在 26~30 ℃，盐度维持在 18~22，溶解氧浓度大于 5.0 mg/L。

1.3 指标测定

饲养阶段结束后，将稚星虫转移至海水深为 10 cm 左右的无沙水槽中停食吐沙 2~3 d，之后收集各水槽内的稚星虫并称重，同时记录稚星虫的成活条数，计算各组的成活率。

成活率(survival rate,SR,％)=$100 \times N_t / N_0$；

增重率(weight gain rate,WGR,％)=$100 \times (W_t - W_0) / W_0$；

特定生长率(specific gain rate,SGR,％／d)=$100 \times (\ln W_t - \ln W_0) / t$。

式中：N_0 为初始条数；N_t 为终末条数；W_0 为初始体重；W_t 为终末体重；t 为试验天数。

采用AOAC(1995)的方法测定稚星虫的体成分和饲料常规成分。采用105 ℃烘箱中烘干至恒重法测定水分含量，凯氏定氮法(Kjeltec 8400,瑞典)测定粗蛋白质含量，索氏抽提法(Soxtec 2050,瑞士)测定粗脂肪含量，以及550 ℃马福炉中灼烧12 h法测定粗灰分含量。稚星虫体腔液AKP活性采用南京建成生物工程研究所研制的试剂盒测定，酶活力用比活力(U/mg prot)表示。采用GB 13885-2003方法进行体腔液中锌含量的测定。

1.4 统计分析

采用SPSS 19.0对所得数据进行方差分析，若差异达到显著水平，则进行Tukey's多重比较，显著性水平为P<0.05。

2 结果与分析

2.1 饲料锌含量对方格星虫稚虫生长性能的影响

由表2可知，各组稚星虫的SR介于63.83%～85.50%，其中9.3与326.5 mg/kg锌组的SR均较低，且显著低于其余各组（P<0.05），说明锌含量过低或过高都对方格星虫的SR产生不利影响。随着饲料中锌含量的提高，稚星虫的WGR和SGR均呈先上升后下降的趋势，其中9.3与326.5 mg/kg锌组无显著差异（P>0.05），但均显著低于其他各组（P<0.05）。饲料锌含量为31.7、49.9、90.1和168.6 mg/kg的4个组，其SR、WGR和SGR均无显著差异（P>0.05）。

表2 饲料锌含量对方格星虫稚星虫生长性能的影响(平均值±标准误)[1]

Table 2 Effects of dietary zinc content on growth performance of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus

锌含量 Zn content/(mg/kg)	初始体重 IBW/mg	终末体重 FBW/mg	成活率 SR/%	增重率 WGR/%	特定生长率 SGR/(%/d)
9.3	14.22±0.23	34.81±1.25^{a}	72.08±2.71^{ab}	144.72±5.62^{a}	1.60±0.04^{a}
31.7	14.89±0.24	52.33±1.88^{b}	85.50±0.90^{c}	251.74±15.85^{b}	2.24±0.08^{b}
49.9	14.51±0.32	53.62±2.35^{b}	80.17±1.23^{bc}	269.16±8.32^{b}	2.33±0.04^{b}
90.1	14.56±0.18	46.69±0.31^{b}	77.92±1.45^{bc}	220.89±5.85^{b}	2.08±0.03^{b}
168.6	14.82±0.19	47.41±2.78^{b}	82.50±2.54^{c}	219.96±18.20^{b}	2.07±0.10^{b}
326.5	14.26±0.16	31.82±1.17^{a}	63.83±2.10^{a}	123.10±5.96^{a}	1.43±0.05^{a}
P 值 P-value	0.251	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

同列数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著(P>0.05)，不同小写字母表示差异显著（P<0.05)。下表同。

In the same column, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (P>0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as below.

通过线性回归分析（图 1），以锌水平 41.93 mg/kg 为界，WGR(y_1)可与饲料锌含量(x_1，9.3、31.7 和 49.9 mg/kg)形成线性关系，其方程为 y_1=3.13x_1+127.04(R^2=0.892)；此外，WGR（y_2）与后 5 组的饲料锌含量(x_2, 31.7、49.9、90.1、168.6 和 326.5 mg/kg)形成线性关系，其方程为 y_2=-0.451 9x_2+277.24(R^2=0.9233)。如图 1 所示，当两线交汇可求出 WGR 最大(258.29%)时的饲料锌含量为 41.93 mg/kg。

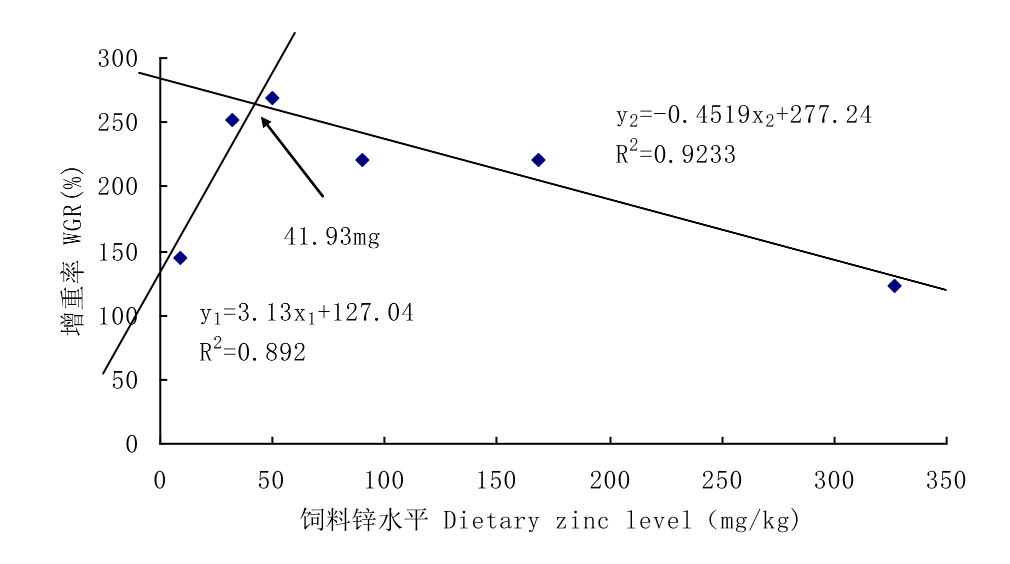


图1 饲料锌含量与方格星虫稚虫的WGR之间的回归分析

Fig.1 Regression analysis between dietary zinc content and WGR of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus

2.2 饲料锌含量对方格星虫稚虫体成分的影响

由表3可知，饲料锌含量对虫体粗脂肪和粗灰分含量有显著影响（P<0.05）。随着饲料锌含量的提高，虫体粗脂肪含量呈现先上升后下降的趋势，当饲料锌含量达到90.1 mg/kg时，其虫体粗脂肪含量最大，为2.85%，并显著高于锌含量为326.5 mg/kg的组（P<0.05）。虫体粗灰分含量随着饲料锌含量的提高呈先下降后上升的趋势，当饲料锌含量为9.3 mg/kg时，虫体的粗灰分含量最高，其次是饲料锌含量为326.5 mg/kg时，且这2组的虫体粗灰分含量均显著高于其余各组（P<0.05），其他各组之间无显著差异（P>0.05）。各组虫体水分含量介于73.74%~74.53%，粗蛋白质含量介于60.46%~63.27%，各组之间无显著差异（P>0.05）。

表3 饲料锌含量对方格星虫稚虫体成分的影响

Table 3 Effects of dietary zinc content on body composition of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus %

锌含量 Zn conten/(mg/kg)	水分 Moisture	粗蛋白质 CP	粗脂肪 EE	粗灰分 Ash
9.3	73.74±0.74	60.56±1.15	2.36±0.11^{ab}	20.31±0.27^{b}

31.7	73.97±0.68	60.46±0.28	2.41±0.10[ab]	18.59±0.10[a]
49.9	74.53±0.33	63.27±4.09	2.54±0.10[ab]	18.46±0.10[a]
90.1	73.96±0.43	61.85±3.91	2.85±0.06[b]	18.15±0.06[a]
168.6	73.86±0.86	62.76±2.40	2.75±0.21[ab]	18.25±0.21[a]
326.5	73.82±0.41	60.89±0.92	2.23±0.07[a]	20.11±0.30[b]
P 值 *P*-value	0.949	0.951	0.023	<0.001

粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分含量为干物质基础。

CP、EE and ash content were DM basis.

2.3　饲料锌含量对方格星虫稚虫体腔液锌含量及 AKP 活性的影响

由表4可知，随着饲料锌含量的提高，虫体的体腔液锌含量呈上升趋势。当饲料锌含量为9.3 mg/kg时，其体腔液锌含量最低，为11.32 mg/L，显著低于锌含量为90.1、168.6和326.5 mg/kg时（$P<0.05$）；当饲料锌含量为326.5 mg/kg时，其体腔液锌含量最高，且显著高于其余各组（$P<0.05$）。而虫体的体腔液中AKP活性则随着饲料锌含量的提高而呈先上升后趋于稳定的趋势。当饲料锌含量为9.3 mg/kg时，虫体的体腔液中AKP活性最低，其次为锌含量为31.7 mg/kg时，上述2组均显著低于其余各组（$P<0.05$）。

表4　饲料锌含量对方格星虫稚虫体腔液锌含量及AKP活性的影响

Table 4　Effects of dietary zinc content on coelomic fluid zinc content and AKP acyivity of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus

锌含量 Zn content/(mg/kg)	锌 Zinc/(mg/L)	碱性磷酸酶 AKP/(U/mg prot)
9.3	11.32±0.36[a]	5.61±0.47[a]
31.7	12.64±0.58[ab]	7.17±0.34[a]
49.9	13.82±0.34[abc]	10.32±0.47[b]
90.1	16.28±1.36[bc]	10.15±0.96[b]
168.6	16.69±0.36[c]	9.96±0.47[b]
326.5	26.87±1.07[d]	10.02±0.38[b]
P 值	<0.001	<0.001

3　讨　论

3.1　饲料锌含量对方格星虫稚虫生长的影响

锌是细胞内最为丰富的微量元素，是多种酶的组成成分或激活剂，为生命不可或缺的必需微量元素之一[1]。饲料中添加的锌主要为2种形式，一种是无机锌，如$ZnSO_4$、$Zn(NO_3)_2$、$ZnCl_2$等，有研究表明，虹鳟（*Oncorhynchus mykiss*）对三者的利用率逐步降低[14]；另一种是有机锌，通常为氨基酸螯合盐，如蛋氨酸锌，与氨基酸螯合后的锌能够利用肠道中的氨基酸吸收通道进行吸收利用，从而避免了在矿物质吸收通道中与其他微量元素的竞争和拮抗作用[12]。在斑点叉尾鮰（*Ictalurus punctatus*）的研究中发现，有机锌的利用率要远高于无机锌的利用率，精制饲料中添加蛋氨酸锌比添加硫酸锌的利用率高3～5倍[15]。因此，本试验选择

蛋氨酸锌为锌源，添加进饲料中投喂方格星虫稚虫。

据前人的研究报道，水产动物对锌的需求有一个适宜的范围，饲料中锌含量过高或过低都将影响其生长发育[16-17]。乔永刚[18]在军曹鱼（*Rachycentron canadum*）的研究中发现WGR受到饲料中锌含量的影响，以蛋氨酸锌为锌源时，随着饲料中锌添加水平的上升，军曹鱼的WGR先上升后下降，以WGR为衡量指标，军曹鱼饲料中最适锌含量为41.7 mg/kg。另外，吴红岩等[16]在奥尼罗非鱼（*Oreochromis niloticus*×*O. aureus*）的研究中也发现，其WGR同样随着饲料中锌添加水平的上升先升后降，饲料锌添加水平为5~10 mg/kg时，鱼体的生长速度较快，并能增强鱼体的抗氧化能力。本试验的结果与上述研究相似，饲料中锌不足(饲料锌含量为9.3 mg/kg)时，方格星虫稚虫的WGR与SGR均较低。在饲料中添加蛋氨酸锌之后，方格星虫的生长状况得到明显改善，证明蛋氨酸锌能被方格星虫稚虫吸收利用。而持续增加饲料中蛋氨酸锌的添加量，使锌含量达到326.5 mg/kg时，其WGR与SGR却出现显著下降。从各组的数据来看，饲料锌含量为9.3 mg/kg与饲料锌含量为326.5 mg/kg的2组，其WGR与SGR均显著低于其余各组，这说明锌虽是方格星虫稚虫生长与发育所必需的一类微量元素，在饲料中必须添加足够的锌来满足方格星虫稚虫生长的需求，但方格星虫稚虫对锌的需要存在一个适宜剂量范围。在这个范围内，锌对生长起积极的作用；当饲料中锌含量过低时，可能会导致方格星虫吸收的锌过少，不能满足生长发育的需要；而饲料中锌含量过高时，一方面有可能导致矿物质之间发生拮抗作用，抑制方格星虫稚虫对铁和铜的吸收利用[12,19-20]；另一方面，方格星虫稚虫吸收了过量的锌，可能会影响虫体机能，产生一些不良反应，阻碍其对饲料营养物质的吸收[18]，但是具体影响机制还有待进一步研究。

而在另一些水产动物，如大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)幼鱼[21]、鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)[22]、方斑东风螺(*Babylonia areolate*)[4]、日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)[23]等的研究中发现，随着饲料锌含量的上升，其WGR先呈上升的趋势，超出最适锌含量之后，与方格星虫稚虫的试验结果不同，WGR并未下降而是趋于平稳。

此外，本试验的SR较低，介于63.83%~85.50%，推测其原因除与饲料锌含量有关之外，还可能与本试验使用的是精制饲料，影响了方格星虫稚虫的适口性有关。

3.2 饲料锌含量对方格星虫稚虫体成分的影响

在本试验中，随着饲料锌含量的提高，方格星虫稚虫虫体水分与粗蛋白质含量没有显著变化，与在军曹鱼[18]、大黄鱼[21]、鲈鱼[22]、方斑东风螺[4]等上的研究结果类似。饲料锌含量对方格星虫稚虫虫体粗脂肪和粗灰分含量有显著影响。饲料锌含量为326.5 mg/kg时，其粗灰分含量较高，同时其粗脂肪含量最低，推测原因可能是饲料锌含量过高使得方格星虫稚虫的生长发育受到抑制，各种营养物质代谢出现异常。饲喂不添加蛋氨酸锌的组同样拥有较高的粗灰分含量和较低的粗脂肪含量，推测原因可能为饲料锌含量过低满足不了方格星虫稚虫生长发育的需求，从而影响了其营养物质代谢[18]。饲料锌含量对方格星虫稚虫体成分影响的具体机制还有待进一步研究。

3.3 饲料锌含量对方格星虫稚虫体腔液锌含量及 AKP 活性的影响

在矿物质的研究中，水产动物机体组织的矿物质含量是评价其对该种矿物质需求量的重要指标[17,24-25]。崔立娇等[17]在星斑川鲽的研究中发现，随着饲料锌含量的增加，全鱼和脊椎中锌含量呈持续上升的趋势，其中饲料锌含量过低或者过高都会对全鱼和脊椎中锌含量产生较大影响。乔永刚[18]在军曹鱼幼鱼的研究中发现，饲料锌含量对其血清锌含量影响显著，饲料锌含量过高（328.2 mg/kg）组的血清锌含量显著高于饲料锌含量低（13.2、36.6、52.5 mg/kg）的各试验组。郭建林等[23]报道，随着饲料锌含量的增加，日本沼虾甲壳和全虾锌含量逐渐上升，并在锌含量为36.89 mg/kg的组达到最大值后趋于平稳；肝胰脏锌含量则在锌含量为33.00 mg/kg的组达到最大值后趋于平稳；而肌肉锌含量则相对较低并维持平稳。张佳明[21]分别测定了大黄鱼脊椎骨、鱼体、血清以及肝脏中的锌含量，除肝脏外，其余各组织都随着饲料锌含量的增加而上升，并逐渐趋于稳定。

本试验结果与上述研究结果类似，饲喂基础饲料的方格星虫稚虫体腔液锌含量最低，随着饲料锌含量的增加，体腔液锌含量持续上升，在饲料锌含量为31.7~168.4 mg/kg时较为平稳，但是再继续升高饲料锌含量则使其体腔液锌含量显著增大。造成这种结果的原因可能是，蛋氨酸锌能被方格星虫稚虫吸收利用并在体腔液中富集，但是饲料中过高的锌含量会导致方格星虫稚虫的营养代谢发生紊乱，使得体腔液中锌含量过高而影响生长。

AKP属于同源二聚体蛋白，是一种能够将对应底物去磷酸化的酶，即通过水解磷酸单酯将底物分子上的磷酸基团除去，并生成磷酸根离子和自由的羟基，其底物包括核酸、蛋白、生物碱等，专一性较低。AKP是生物体内一种含锌的重要代谢调控酶，能够较真实地反映养殖动物锌的营养状况[24]。在本试验中，随着饲料锌含量的不断上升，方格星虫稚虫体腔液锌含量也不断上升，但体腔液中AKP的活性却并非如此。经测定，体腔液中AKP活性呈先上升后趋于平稳的趋势，当饲料锌含量为9.3 mg/kg时，其AKP的活性最低，为5.61 U/mg prot，其次为锌含量为31.7 mg/kg时，这2组的体腔液AKP活性均显著低于其余各组。当饲料锌含量上升至49.9 mg/kg时，体腔液AKP活性最高，之后再添加锌，AKP的活性不再上升，饲料锌含量为49.9~326.5 mg/kg的各组之间差异不显著。在斑点叉尾鮰[26]、虹鳟[27]、方斑东风螺[4]和军曹鱼[18]的研究中也观察到AKP的活性在达到一定水平时趋于稳定。本试验在饲料锌含量较低时体腔液中AKP活性低的可能原因是方格星虫稚虫体内缺锌导致AKP合成不足；而当饲料中锌含量为49.9 mg/kg时，体腔液中AKP活性达到最高，之后再继续添加锌，AKP的活性不再有显著变化，可能原因在于AKP活性受机体调控，并不会随着体内锌含量的持续增加而增高，但具体调控机制还有待进一步的研究证明。

4 结 论

饲料中适宜含量的锌对方格星虫稚虫的WGR与SGR都极为有利，锌含量过高或过低的则会对方格星虫稚虫的生长起抑制作用，以WGR为评价标准，方格星虫稚虫饲料中适宜锌

含量为41.93 mg/kg。

参考文献：

[1] 曹振杰,王兰明,董文,等.鱼虾类微量元素的需要量及其营养生理探讨[J].黑龙江水产,2006(4):40–42.

[2] 陈琴,程光平.鱼虾类对微量矿物元素的需要[J].中国饲料,2001(20):20–22.

[3] 王则民.元素的生物选择规律[J].自然杂志,1997,19(1):47–49.

[4] 杨原志,吴业阳,董晓慧,等.方斑东风螺饲料中锌需要量的研究[J].动物营养学报,2013,25(3):643–650.

[5] 李凤鲁,孔庆兰,史贵田,等.中国沿海方格星虫属(星虫动物门)的研究[J].青岛海洋大学学报,1990,20(1):93–99.

[6] 张桂和,李理,赵谋明,等.方格星虫营养成分分析及抗疲劳作用研究[J].营养学报,2008,30(3):318–320.

[7] 张琴,童万平,董兰芳,等.饲料中脂肪水平对方格星虫稚虫生长性能、体组成及消化酶活性的影响[J].渔业科学进展,2011,32(6):99–106.

[8] 张琴,童万平,董兰芳,等.饲料蛋白水平对方格星虫稚虫生长和体组成的影响[J].渔业科学进展,2012,33(1):86–92.

[9] 许明珠,张琴,童万平,等.饲料糖水平对方格星虫稚虫生长、体组成和消化酶活性的影响[J].动物营养学报,2013,25(3):534–542.

[10] 许明珠,张琴,童潼,等.饲料中硒含量对方格星虫稚虫生长、体成分、组织硒含量及相关酶活性的影响[J].动物营养学报,2015,27(6):1733–1739.

[11] 许明珠,张琴,童潼,等.饲料铁水平对方格星虫稚虫生长性能、体成分、酶活性及组织铁含量的影响[J].动物营养学报,2014,26(11):3325–3331.

[12] 许明珠,张琴,童潼,等.饲料中锰含量对方格星虫稚虫生长性能、体成分、体腔液中锰超氧化物歧化酶活性及组织锰含量的影响[J].动物营养学报,2015,27(10):3077–3083.

[13] BLAIR T,CASTELL J,NEIL S,et al.Evaluation of microdiets versus live feeds on growth,survival and fatty acid composition of larval haddock (*Melanogrammus aeglefinus*)[J].Aquaculture,2003,225(1/2/3/4):451–461.

[14] 佐藤秀一.虹鳟对白鱼粉中的锌以及几种锌化合物的利用[J].日本水产学会,1987,53(4):63–65.

[15] PARIPATANANONT T,LOVELL R T.Chelated zinc reduces the dietary zinc requirement of channel catfish,*Ictalurus punetatus*[J].Aquaculture,1995,133(1):73–82.

[16] 吴红岩,陈孝煊,阳会军,等.饲料中添加蛋氨酸锌对奥尼罗非鱼幼鱼生长和抗氧化功能的影响[J].淡水渔业,2007,37(6):28–32.

[17] 崔立娇,张利民,王际英,等.饲料锌水平对星斑川鲽幼鱼生长、组织积累和抗氧化功能的影响[J].水产学报,2010,34(9):1420–1428.

[18] 乔永刚.军曹鱼微量元素锌、铁、铜营养生理的研究[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2007.

[19] 南旭阳.Cu^{2+}对鲫鱼体内 Zn^{2+}和血红蛋白含量影响[J].中国公共卫生,2006,22(1):62–63.

[20] HILTON J W.The interaction of vitamins,minerals and diet composition in the diet of fish[J].Aquaculture,1989,79(1/2/3/4):223–244.

[21] 张佳明,艾庆辉,麦康森,等.大黄鱼幼鱼对饲料中的锌需要量[J].水产学报,2008,32(3):417–424.

[22] 张佳明.鲈鱼和大黄鱼微量元素-锌、铁的营养生理研究[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2007.

[23] 郭建林,陈建明,孙丽慧,等.日本沼虾幼虾对饲料中锌的需求量[J].动物营养学报,2013,25(3):661–668.

[24] 徐志雄,董晓慧,刘楚吾.军曹鱼幼鱼日粮锌最适添加量的研究[J].水产科学,2007,26(3):138–141.

[25] 魏万权,李爱杰,李德尚.饲料中添加锌对牙鲆生长和生化指标的影响[J].青岛海洋大学学报,1999,29(1):60–66.

[26] GATLIN Ⅲ D M,WILSON R P.Dietary zinc requirement of fingerling channel catfish[J].The Journal of Nutrition,1983,113(3):630–635.

[27] APINES M J,SATOH S,KIRON V,et al.Bioavailability of amino acids chelated and glass embedded zinc to rainbow trout,*Oncorhynchus mykiss*,fingerlings[J].Aquaculture Nutrition,2001,7(4):221–228.

Effects of Dietary Zinc Content on Growth Performance, Body Composition, Coelomic Fluid Zinc Content and Alkaline Phosphatase Activity of Juvenile Peanut Worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus

XU Mingzhu ZHANG Qin* TONG Tong DONG Lanfang YANG Jialin JIANG Yan HUANG Guoqiang

(*Guangxi Institute of Oceanology, Key Laboratory of Marine Biotechnology of Guangxi, Beihai* 536000, *China*)

Abstract: This trial was conducted to investigate the effects of dietary zinc content on growth performance, body composition, coelomic fluid zinc content and alkaline phosphatase (AKP) activity of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus （*S. nudus*）. Juvenile peanut worm with the average body weight of (14.54±0.10) mg were fed six isonitrogenous and isoenergetic microparticle diets with different supplemental levels of zinc (zinc methionine as zinc source) for 8 weeks, and the measured zinc contents were 9.3, 31.7, 49.9, 90.1, 168.6 and 326.5 mg/kg, respectively. Each diet had three replicates and each replicate had 400 juvenile peanut worm. The results showed that the dietary zinc content had significant effects on weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and survival ratio (SR) of *S. nudus* (P<0.05). When the dietary zinc content was 49.9 mg/kg, WGR and SGR produced the maximum value, and significantly higher than those in the lowest (9.3 mg/kg) and the highest (326.5 mg/kg) zinc content groups (P<0.05). Dietary zinc content had significant effects on body ether extract and ash contents (P<0.05). With the increase of dietary zinc content, body ether extract content was firstly increased and then decreased, while body ash content showed the opposite trend. No significant differences were observed in body moisture and crude protein contents of *S. nudus* among all groups (P>0.05). Dietary zinc content significantly affected coelomic fluid zinc content and AKP activity of *S. nudu s*(P<0.05). With the increase of dietary zinc content, the coelomic fluid zinc content of *S. nudus* was sustained rise, when the dietary zinc content was 326.5 mg/kg, it produced the maximum value. Moreover, the coelomic fluid AKP activity was firstly increased and then tends to be stable, when the dietary zinc level was 49.9 mg/kg, it produced the maximum value. With WGR as the evaluating index, the suitable dietary zinc content of juvenile peanut worm is 41.93 mg/kg by

---

*Corresponding author, ZHANG Qin, associate professor, E-mail: zhangqin821220@163.com
(责任编辑　菅景颖)

regression analysis.

Key words: juvenile peanut worm; zinc; growth performance; body composition; coelomic fluid zinc content; AKP activity